



认知无线网络中拓扑重构的研究

贺 倩

(中国信息通信研究院通信标准研究所 北京 100191)

摘 要:随着异构网络融合和网络自适应化逐渐成为必然的发展趋势,认知无线网络随之出现,并提供了一种实现全局端到端目标优化的方法。认知无线网络由能自适应改变自身配置的网络设备组合而成,为设计灵活高效的拓扑策略提供了可能性和保障。提出了一种拓扑重构的控制策略,能够规划数据传输路由,在高效利用空闲频谱资源的同时,提升了传输的效率和性能。

关键词:认知无线网络;重构;拓扑;异构网络融合

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015147

Research on Topology Reconfiguration in Cognitive Radio Networks

He Qian

(Communications Standards Research Institute, China Academy of Information and
Communication Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering the inevitable trends for heterogeneous network convergence and self-adaptation ability, cognitive radio network (CRN) concept has been proposed with some essential characteristics to achieve global end-to-end goals. CRN are composed of cognitive devices which have the capable of changing network configurations based on the dynamic environment. This capability opens up the possibility of designing flexible and dynamic topology control strategies with the purpose of opportunistically reusing idle licensed spectrum and effectively achieving data transmission. This work focuses on the problem of designing effective topology reconfiguration algorithm to offer optimal routing solutions.

Key words: cognitive radio network, reconfiguration, topology, heterogeneous network convergence

1 引言

传统无线频谱资源的低利用率和当前巨大的频谱需求之间的矛盾,促成了认知无线电技术的产生。认知无线

电技术引入认知用户的概念,允许认知用户在授权频段空闲时进行机会式的接入,从而为弥合有限频谱资源和巨大频谱需求之间的缺口提供解决方案。认知无线电技术通过采用频谱感知、动态频谱分配以及动态频谱共享等机制,

收稿日期:2015-01-19;修回日期:2015-06-11

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(No.2014ZX03002003)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2014ZX03002003)

论文引用格式:贺倩. 认知无线网络中拓扑重构的研究. 电信科学, 2015147

He Q. Research on topology reconfiguration in cognitive radio networks. Telecommunications Science, 2015147

进一步提升了无线网络的频谱利用率。但认知无线电特有的感知、推理、学习以及自适应性使得认知无线网络比传统网络更加复杂和难以管理^[1]。同时,无线网络发展进程带来的网络异构化和动态化以及未来无线通信系统所必须要面对的多种无线接入标准和复杂的频谱分配形式,使得认知无线网络管理与性能提升变得更加困难^[2]。在这种情况下,拓扑重构技术作为认知无线网络中的一项关键技术,对于支持异构网络之间的数据传输、适应时变的动态环境和管理不同频段联合资源分配起到了重要的作用。因此,有效的拓扑重构解决方案有必要整合在认知无线网络中,以便解决在认知环境中所特有的问题与挑战。

拓扑重构要保证动态认知无线环境中的数据传输,面对的问题与挑战为:可用频谱资源由主用户的空闲状态决定,频谱资源的改变会引起拓扑变化;节点动态的移动使得网络的连通性一直产生变化,从而导致网络拓扑变化;在异构环境中,不同网络认知用户的按需路由需要考虑到不同网络的特性进行链路连接,这可能需要改变原有拓扑结构才能完成数据传输;节点频繁在不同信道之间进行信道切换会带来严重的切换时延,影响网络性能;全局拓扑信息无法准确获知;从用户需要避免对主用户的干扰,在主用户出现时会产生退避时延。

为了面对这些挑战,同时结合认知无线网络的需求,一个新型网络拓扑重构管理模型的提出对网络管理来说是十分必要的。然而,迄今为止的大部分拓扑管理研究都没有全面地考虑到上文所列出的挑战^[3]。Jia 等人^[4]提出的针对异构网络环境下的拓扑管理与路由选择机制,考虑了频谱异构性给认知无线网络带来的影响,并且通过认知用户协助传输提高了异构共存系统的吞吐量,然而没有考虑

到节点的移动性对整个拓扑和路由的影响。Zeng 等^[5]以及 Zhang 等人^[6]提出的基于动态频谱分配的拓扑与路由管理机制能够很好地解决频谱资源的变化所带来的拓扑变化问题,但却相应地简化了应用场景,没有考虑复杂的异构环境。Abbagnale 等人^[7]在考虑节点移动性会影响链路连通性的基础上,进行了拓扑推断和重置的研究,但忽视了频谱资源的不均等分配对拓扑产生的影响。本文通过分析需要引入拓扑重构的情景,找出影响拓扑重构的基本因素,从而建立了拓扑重构的管理模型和决策算法,实现了自主调整复杂环境下的拓扑结构并优化网络性能的目标,最后给出仿真结果和分析。

2 系统模型与场景分析

设定一个由异构网络组成的认知无线网络场景,在该认知无线网络中存在一定数目的主用户、认知用户以及主用户所拥有的频谱资源。系统性能随着竞争用户的数量和可用信道资源的变化而动态变化。优化的目标是对网络拓扑进行重构管理,以获得最佳的传输质量和网络性能。

当网络负载不均衡时,负载较大的网络可以挑选负载较小的网络中的节点帮助其进行传输,这样就会需要拓扑重构对原有的拓扑结构进行改变,以适合新的传输需求,如图 1 所示。

当部分网络节点损坏时,原来经过该节点进行传输的数据会阻塞在损坏的节点上,此时拓扑重构需要重新规划拓扑结构避开损坏的节点,以保证数据传输的畅通,如图 2 所示。

在认知无线网络中,认知用户进行传输需要使用主用户暂时不使用的空闲频段。但当该信道的授权主用户突然

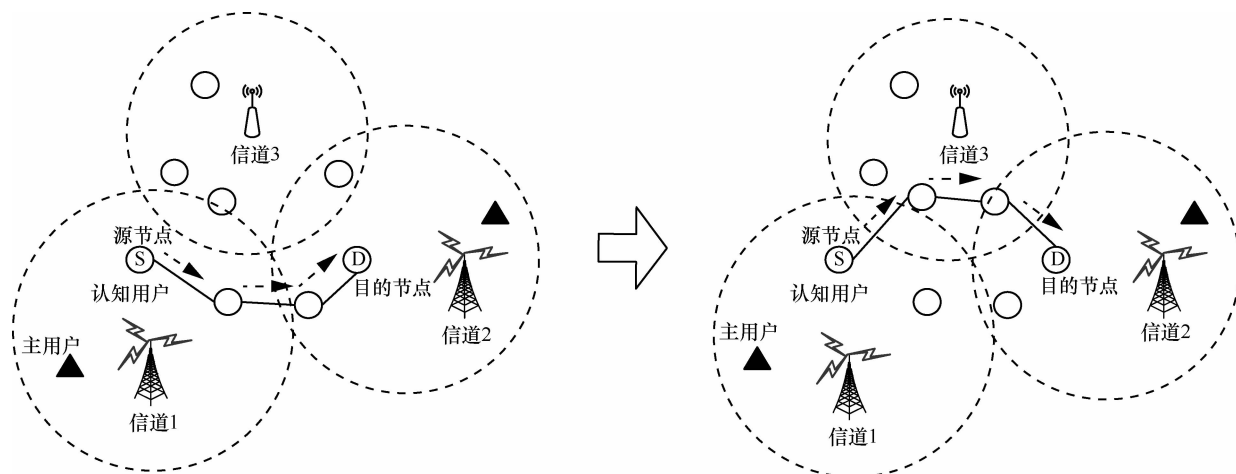


图 1 负载不均衡场景

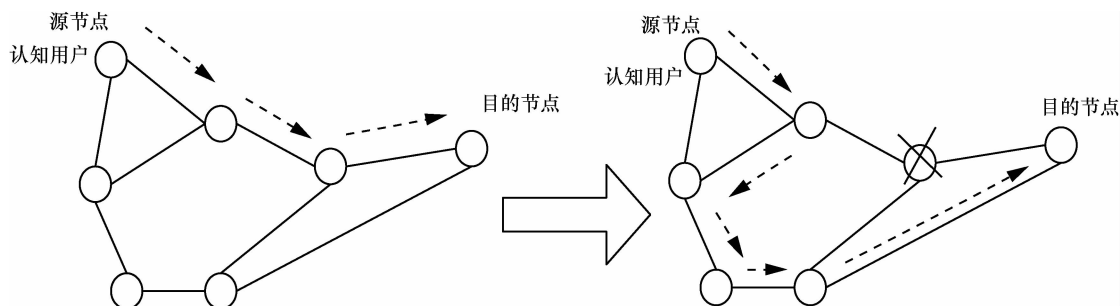


图2 故障节点场景

出现并开始占用信道时,就需要拓扑重构改变拓扑,以避免主用户的干扰圈,既保证主用户的传输不受干扰又保证认知用户的传输不中断,如图3所示。

认知网络是动态变化的,同时网络中的节点也是移动的。当原来拓扑上相连的两节点因为移动而越来越远时,这种移动性使得网络拓扑必须在一定周期内进行重新规划与计算,如图4所示。

3 问题分析与描述

从场景分析来看,设计高效的认知无线网络拓扑重构方案需要考虑以下几个问题:局部网络拓扑情况的获取与

推断;移动性的对抗;频谱资源的动态分配;链路性能的提升。下面分别探讨这几个方面在拓扑重构决策过程中产生的影响。

3.1 局部拓扑情况的获取与推断

局部拓扑情况的获取可以得到两个拓扑重构关注的情况,其一是看附近是否有故障节点,其二是寻找合适的邻居节点协助数据传输进行负载均衡。

为了更加准确地解决网络测量部分的难题,引入认知网络层析成像技术^[8]。认知网络层析成像技术是医学上的断层扫描技术和 Vardi^[9]所提出的网络层析成像技术的结合。网络层析成像技术采用端到端的测量技术,不仅关注链路

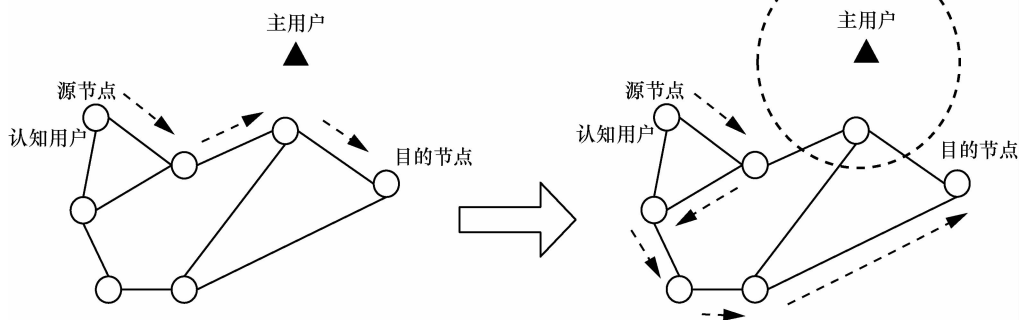


图3 主用户出现占用信道场景

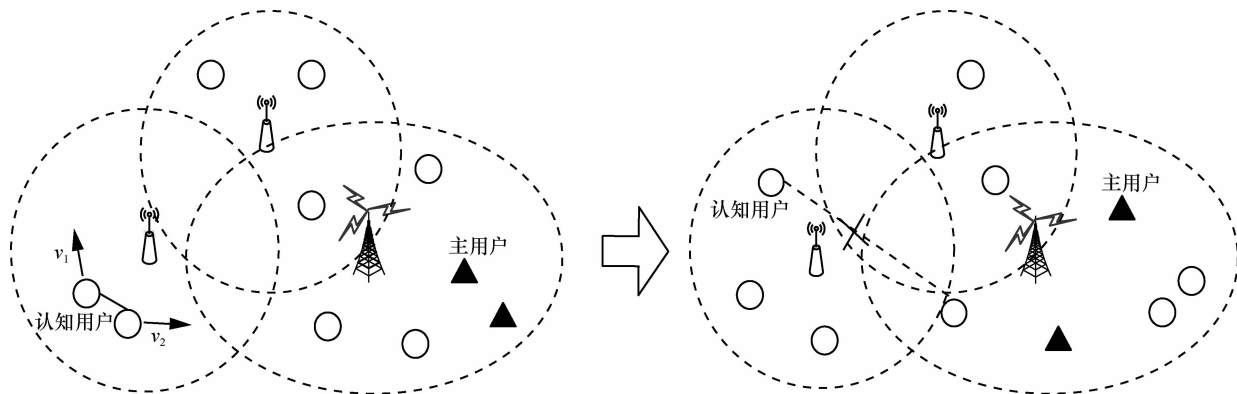


图4 节点移动性场景

级的参数并且关注网络级的参数,随后根据测量所获得的参数信息进行网络拓扑的推断。由于认知无线网络中的一些特性,认知网络层析成像技术基于网络层析成像技术做出了几点改进:首先,由于认知无线网络中的频谱限制,减少了探测分组的数量和长度,以避免产生拥堵和资源的浪费;其次,由于认知无线网络具有异构性,各个异构网络可以支持的协议不同,考虑多播和单播协议在大多数网络中都被支持,因此采用多播和单播协议进行测量分组的传递。

采用多播模式的认知网络层析成像技术实现过程如图 5(a)所示。源端发送测量分组,测量分组在各个节点之间传递并转发。如果中间有节点损坏,下面的节点将会收不到测量分组;而没有故障节点存在时,因为链路性能不同,每个节点收到测量分组的时间也不会相同,通过分组到达时间的比较可以计算出相应链路的时延特性。采用单播模式的认知网络层析成像技术实现过程如图 5(b)所示。源端发送的测量分组数量与叶子节点的数量相等,并且测量分组之间存在发送间隔 ΔT ,通过计算分组到达时的时间间隔与 ΔT 之间的差值,相应链路的时延特性也可计算出来。这样在经过认知网络层析成像技术的分析后,局部拓扑的信息,包括故障节点信息、邻居节点信息以及链路时延信息就都可以获得。

3.2 移动性与稳定性

基于已得到的拓扑信息可以知道当前局部各个节点的位置,而在进行多次测量后,通过测量出的不同拓扑之间的对比还可以得到节点的位置变化。设定节点 i 的邻居节点集合为 F_i ,定义 i 的可用转发节点 $i_j \in F_i$,则有:

$$\varphi(i_j) = \begin{cases} 1, & i_j \in F_i \text{ 且 } i \text{ 到 } i_j \text{ 之间可建立链路} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

假定每个节点的发射功率是相同的,且环境中噪声一定,当节点之间的距离大于传输圈半径时,两个节点将无法接收到对方消息,两点之间的链路将无法建立。该传输半径可以计算如下:

$$r = 10^{\frac{p_i - 32.4 - 20 \lg f_c}{20}} \quad (2)$$

其中, p_i 为节点 i 的发射功率, f_c 为载波频率,只有当两点之间的距离 $d_{i,j} < r$ 时两点之间才可能建立链路。如图 4 所示,假定在时刻 t_0 测量到节点 i 与 j 之间的初始距离为 d_0 且坐标分别为 (x_{i0}, y_{i0}) 和 (x_{j0}, y_{j0}) , 分别以 v_i 和 v_j 速度移动,在时刻 t_1 坐标变为 (x_{i1}, y_{i1}) 和 (x_{j1}, y_{j1}) , 两节点之间的距离变为 d_1 , 那么 v_i 和 v_j 可计算如下:

$$\begin{cases} v_i = \sqrt{(x_{i1} - x_{i0})^2 + (y_{i1} - y_{i0})^2} / (t_1 - t_0) \\ v_j = \sqrt{(x_{j1} - x_{j0})^2 + (y_{j1} - y_{j0})^2} / (t_1 - t_0) \end{cases} \quad (3)$$

可以推导出在时刻 t_i 节点 i 与 j 之间的距离为:

$$d_{i,j} = \sqrt{d_0^2 + (v_i - v_j \cos \theta)^2 (t_i - t_0)^2} \quad (4)$$

其中, θ 为两个节点移动方向的角度。设定 $T_i = t_i - t_0$, 那么 $d_{i,j} < r$ 的概率可计算如下:

$$\begin{aligned} \Pr\{d_{i,j} < r\} &= P\{d_0^2 + (v_i - v_j \cos \theta)^2 T_i^2 < r^2\} \\ &= \Pr\{T_i < \frac{\sqrt{r^2 - d_0^2}}{v_i - v_j \cos \theta}\} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)表明链路的稳定性与节点移动速度的大小、角度

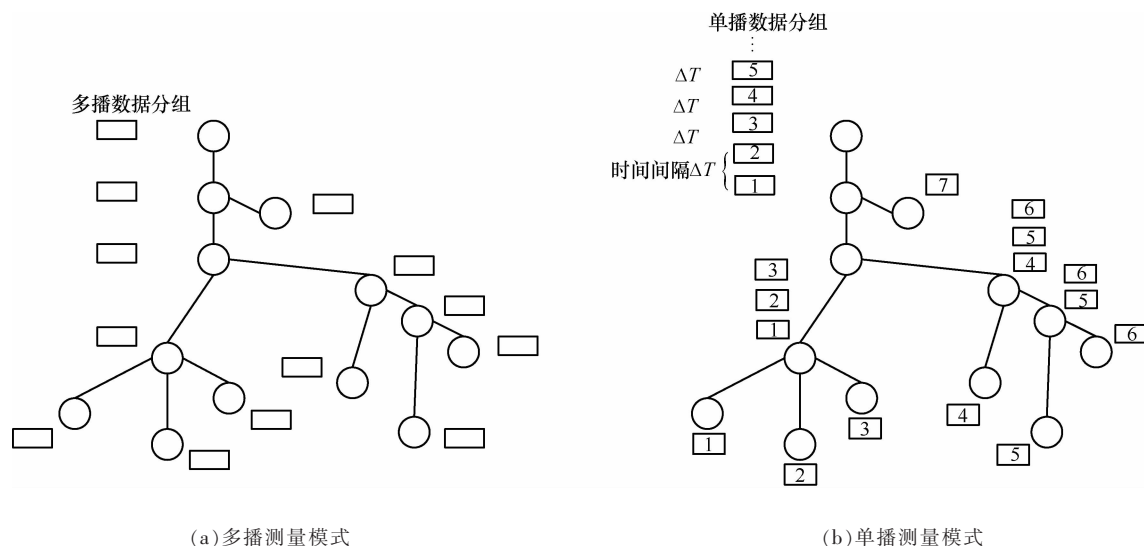


图 5 认知网络层析成像技术测量过程



以及时间都有关系。所以在做拓扑重构决策时,式(5)是一个重要的约束条件。

3.3 频谱保证

在认知无线网络中,拓扑重构不仅要对抗节点的移动性,还要分配合适的频谱资源给数据传输,而合适不仅体现在要保证主用户传输不受干扰,同时还要保证认知用户之间的传递信息不间断。

首先定义节点 i 与 i_f 之间的链路 l_{i,i_f} 如下:

$$l_{i,i_f}^k = \begin{cases} 1, & i \text{ 到 } i_f \text{ 的链路可使用信道 } k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

从保护主用户的角度出发,要保证主用户不受干扰,频谱分配的约束条件可以表示如下:

$$l_{i,i_f}^k (p_i - \eta) < \bar{\zeta}, \forall i_f \in F_i, i = 1, \dots, I \quad (7)$$

其中, η 为认知用户到主用户的路径损耗, $\bar{\zeta}$ 为主用户所能承受的最大干扰阈值, p_i 为发射功率。而从保证认知用户的数据传输质量的角度出发,要保证认知用户的信噪比能够维持在一定的水平上,频谱分配的约束条件可以表示如下:

$$\frac{l_{i,i_f}^k p_i}{N_0 + h(p_k) + l_{j,j_f}^k \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^I c_{ij}^k p_j} > \bar{\gamma}, \forall i_f \in F_i, i, j = 1, \dots, I \quad (8)$$

其中, N_0 为噪声, $\sum c_{ij}^k p_j$ 代表由其他认知用户产生的共道干扰, $h(p_k)$ 代表主用户对认知用户的干扰,为预定的信噪比阈值。要同时考虑以上两种情况,就要把式(7)和式(8)两个约束条件均考虑在内。

3.4 链路性能的提升

通过对于移动性的分析和动态频谱的分配可以得到可用链路的集合,但在拓扑重构决策时还要考虑链路的性能,包括信道的传输能力以及时延特性。

(1) 信道传输能力

信道传输能力可以通过香农公式进行界定,在节点 i 与 i_f 之间的链路使用信道 k 时,最大的信道传输能力 S_{i,i_f}^k 可表示如下:

$$S_{i,i_f}^k = W_k \lg \left(1 + \frac{p_i}{n_0} \right) \quad (9)$$

其中, n_0 为噪声, p_i 为发射功率, W_k 为信道 k 的可用带宽。设定信道传输能力需求为 s , 可得到信道传输能力方面的约束条件为:

$$\begin{aligned} \Pr\{S_{i,i_f}^k \geq s\} &= \Pr\{W_k \lg(1 + \frac{p_i}{n_0}) \geq s\} \\ &= \Pr\{p_i \geq n_0(2^{\frac{s}{W_k}} - 1)\} \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 时延特性

对于链路的时延约束,可以表示如下:

$$\Pr\{U_{i,i_f}^k \leq u\} = \Pr\left\{\sum_{i_f} \sum_i u_{i,i_f} l_{i,i_f}^k \leq u\right\} \quad (11)$$

其中, u_{i,i_f} 为链路 l_{i,i_f} 在传输时产生的时延, u 为整个链路可接受的最大时延。式(11)约束了一条完整传输链路的时延情况。

4 优化模型建立和算法描述

综合上文对于链路稳定性和移动性约束、频谱使用约束以及总体性能约束的情况,综合式(5)、式(8)、式(10)和式(11),拓扑重构选择可以用如下的最优化形式表示:

$$\begin{aligned} &\text{Maximize}_{l_{i,i_f}} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I l_{i,i_f}^k \\ \text{s.t.} \quad &T_i < \frac{\sqrt{r^2 - d_i^2}}{v_i - v_{i_f} \cos \theta}, \forall i_f \in F_i, i, j = 1, \dots, I \\ &l_{i,i_f}^k (p_i - \eta) < \bar{\zeta}, \forall i_f \in F_i, i = 1, \dots, I \\ &\frac{l_{i,i_f}^k p_i}{N_0 + h(p_k) + l_{j,j_f}^k \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^I c_{ij}^k p_j} > \bar{\gamma}, \forall i_f \in F_i, i, j = 1, \dots, I \\ &\sum_{k=1}^K l_{i,i_f}^k \leq 1, \forall k = 1, \dots, K, i = 1, \dots, I \\ &l_{i,i_f}^k + l_{j,j_f}^k \leq 1, \forall c_{ij}^k = 1, i_f \in F_i, i, j = 1, \dots, I, k = 1, \dots, K \\ &p_i \geq n_0(2^{\frac{s}{W_k}} - 1), \forall k = 1, \dots, K, i = 1, \dots, I \\ &\sum_{i_f} \sum_i u_{i,i_f} l_{i,i_f}^k \leq u, \forall i_f \in F_i, i, j = 1, \dots, I \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)优化问题的优化目标为拓扑矩阵 L , 其中, $l_{i,i_f}^k \in L$, 而优化约束包括: 移动性约束, 节点之间的距离要小于阈值 r ; 频谱共享约束, 对主用户的干扰要小于 $\bar{\zeta}$, 认知用户信噪比要大于 $\bar{\gamma}$, 且同一频谱资源在同一时刻只能分配给一个用户; 性能约束, 满足传输能力大于阈值 s , 时延小于 u 。

拓扑重构算法可以描述如下:

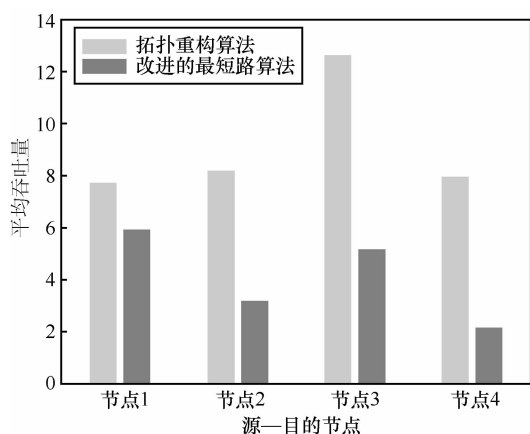
- 根据网络层析成像技术完成局部节点拓扑情况的发现;
- 记录各节点之间距离以及移动情况,完成候选 i_j 矩阵记录可用的跳转节点;
- 综合考虑式(12)中的所有约束条件,通过优化计算得出最优化的 i_j ,具体优化计算方法记录于参考文献[10]中;
- 通过迭代完成整条传输链路的选取。

5 仿真和验证

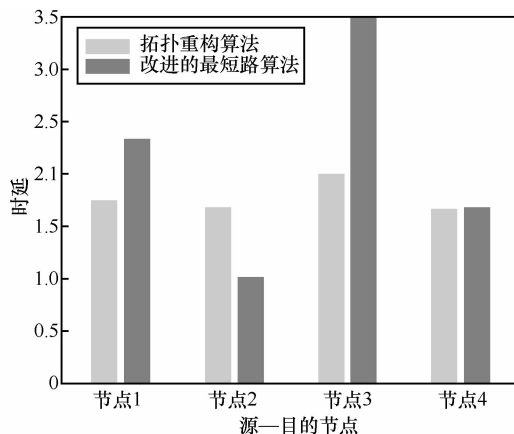
在仿真中,本文考虑在一个 100×100 的区域中采用随机分布方法进行布点,并设置带宽、时延与传输消耗。通过对 4 对不同的源—目的节点,分别采用拓扑重构算法和参

考文献[11]中的改进最短路算法进行验证,在验证过程中,两种算法均采用一致的优化迭代计算方法,仅在优化目标和约束条件设置上有所不同,评估拓扑重构算法在 3 种不同情景下的性能。

图 6~图 8 表现了在普通路由查找、网络有坏节点情况以及主用户突然出现 3 种情况下,拓扑重构算法和改进的最短路算法在吞吐量和时延方面的比较。图 6 和图 7 表现了采用改进的最短路算法时,所查找的路径质量完全受制于环境,无法提供更加优化的方案;同时拓扑重构算法可以通过环境自适应调整路由,选择一条质量更好的路径。而在图 8 中,由于主用户出现占用信道,改进的最短路算法无法找到合适的链路连接第三对源—目的节点,而拓扑重构算法则提供了高效的链路连接。

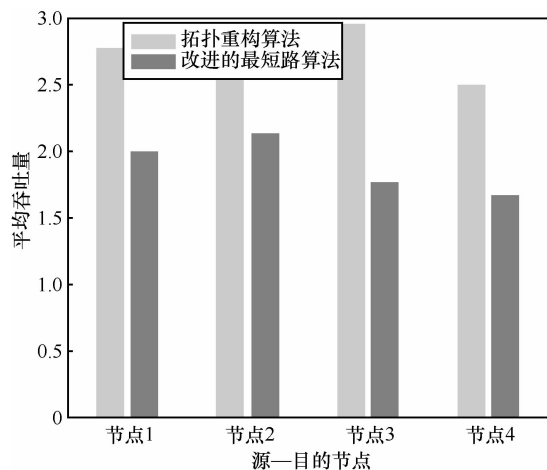


(a) 吞吐量

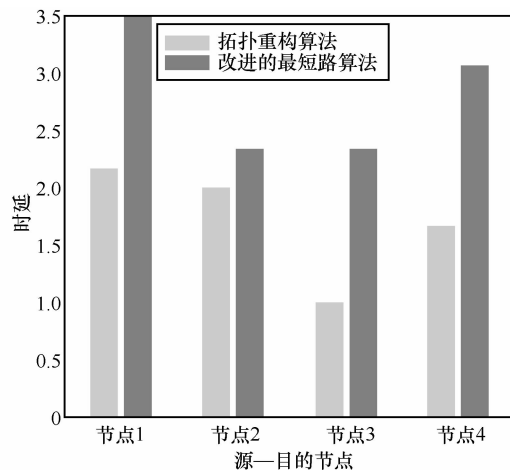


(b) 时延

图 6 拓扑重构算法与改进的最短路算法在路由查找方面的比较



(a) 吞吐量



(b) 时延

图 7 拓扑重构算法与改进的最短路算法在网络有坏节点存在情况下的比较

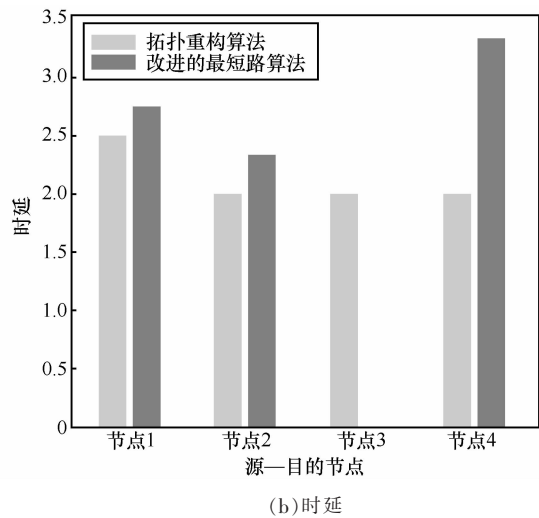
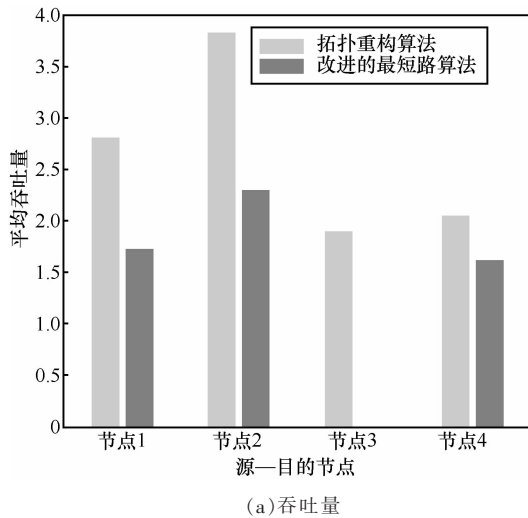


图8 拓扑重构算法与改进的最短路算法在主用户出现情况下的比较

6 结束语

认知无线网络中的拓扑重构技术将有效提升认知无线网络中的数据传输速率和网络性能。本文通过对于局部拓扑情况的探知,充分考虑链路稳定性和移动性约束、频谱使用约束以及总体性能约束,建立了拓扑重构的自主决策算法,实现了自适应地调整复杂异构环境下的拓扑结构,以达到网络性能最大化的目标。最后通过仿真,验证了认知无线网络拓扑重构算法的性能。与改进的最短路算法相比较,在拓扑管理方面,拓扑重构算法能更加灵活地适应环境,并完成高效的路由选择。

参考文献

- Demestichas P, Dimitrakopoulos G, Strassner J, *et al.* Introducing reconfigurability and cognitive networks concepts in the wireless world. *IEEE Veh Technol Mag*, 2006, 1(2): 32~39
- Thomas R W, Friend D H, Dasilva L A, *et al.* Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives. *IEEE Commun Mag*, 2006(44): 51~57
- Cesana M, Cuomo F, Ekici E. Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions. *Ad Hoc Netw*, 2011, 9(3): 228~248
- Jia J, Zhang J, Zhang Q. Cooperative relay for cognitive radio networks. *Proceedings of INFOCOM 2009, Rio de Janeiro, Brazil*, 2009: 2304~2312
- Zeng K, Yang Z, Lou W. Opportunistic routing in multi-radio

multi-channel multi-hop wireless networks. *Proceedings of INFOCOM 2010, San Diego, USA*, 2010

- Zhang T, Wu Y, Lang K. Joint spectrum allocation and relay selection in cellular cognitive radio networks. *Mobile Netw Appl*, 2011(16):748~759
- Abbagnale A, Cuomo F. Gymkhana: a connectivity-based routing scheme for cognitive radio ad hoc networks. *Proceedings of INFOCOM 2010, San Diego, USA*, 2010
- Yu C K, Chen K C, Cheng S M. Cognitive radio network tomography. *IEEE Trans on Veh Technol*, 2010, 59(4): 1980~1997
- Vardi Y. Network tomography: estimating source-destination traffic intensities from link data. *Journal of the Amer Stat Assoc*, 1996, 91(433): 365~377
- He Q, Feng Z Y, Zhang P. Reconfiguration decision making based on ACO in cognitive radio network. *Wireless Personal Communications*, 2013,71(2): 1247~1269
- 张美玲. 最短路问题的一个改进蚁群算法 (硕士学位论文). 兰州大学, 2008
- Zhang M L. An improved ant colony algorithm for shortest path problem (master dissertation). Lanzhou University, 2008

[作者简介]



贺婧,女,博士,中国信息通信研究院通信标准研究所工程师,主要研究方向为无线网络架构和技术、移动网络业务、5G 相关技术等。参与制定了多项 OMA、CCSA 等国际国内标准,先后发表了多篇 SCI 以及 EI 论文。